

トンネルにおける逆解析のための変位計測位置の選定法

山口大学 正 清水則一 学 ○ 垣原裕 正 中川浩二 神戸大学 正 桜井春輔

1. はじめに

情報化施工の普及にともないトンネル施工時に地山の挙動を計測することが定着している。ところが、計測機器の配置は一般に経験的に定めることが多く、どのような配置が最適であるかを検討するための客観的手法はないようである。本研究は、筆者らが提案した計測変位の逆解析方法を適用する場合を対象として、逆解析が精度良く実施できるための適切な計測配置を定量的に検討できる方法を提案するものである。

2. 逆解析法の概要¹⁾⁻³⁾

トンネル周辺地山を巨視的に等質等方の線形弾性体と考え、さらに掘削地点で初期応力が一定であるとすると、二次元平面ひずみ問題の場合、掘削によって生じる変位 u は、次のように表される (図 1 参照)。

$$u = f_1(\sigma_x^0/E) + f_2(\sigma_y^0/E) + f_3(\tau_{xy}^0/E) \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ は初期応力の各成分、 E は弾性係数である。また、 $\sigma_x^0/E, \sigma_y^0/E, \tau_{xy}^0/E$ を初期応力パラメータと呼ぶ。 f_1, f_2, f_3 は変位の位置と方向、および、空洞の形状ならびにポアソン比を与えれば求められる。式 (1) を変位の観測式として、計測変位との残差の二乗和を最小とする初期応力パラメータを求める。

$$\{\sigma^{0*}\} = ([F]^T[F])^{-1}[F]^T\{u_m\} \quad (2)$$

ただし、 $[F]$ は f_1, f_2, f_3 で構成される行列、 $\{u_m\}$ は計測変位、 $\{\sigma^{0*}\}^T = \{\sigma_x^0/E, \sigma_y^0/E, \tau_{xy}^0/E\}$ である。ここで、初期応力の鉛直成分 σ_y^0 を土被り圧 $\gamma \cdot H$ (γ : 地山の単位体積重量、 H : 土被り深さ) に等しいとおけば、地山の弾性係数および初期応力の他の成分は次のように求められる。

$$E = \gamma \cdot H / \sigma_y^{0*}, \quad \sigma_x^0 = \sigma_x^{0*} \cdot E \quad (\text{あるいは側圧係数: } K = \sigma_x^{0*} / \sigma_y^{0*}), \quad \tau_{xy}^0 = \tau_{xy}^{0*} \cdot E \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_x^{0*} = \sigma_x^0/E, \sigma_y^{0*} = \sigma_y^0/E$ および $\tau_{xy}^{0*} = \tau_{xy}^0/E$ である。

3. 計測位置の良好度を表す指標

一般に測定変位は計測機器の精度に応じて、ある誤差を含んで計測される。したがって、逆解析によって得られる諸量もその測定誤差の影響を受ける。そこで、計測変位の精度 (標準偏差) を σ_u^0 とおくと、逆解析によって得られる地山の弾性係数、側圧係数および初期応力のせん断成分の精度は、それぞれ式 (3) に誤差伝搬則を適用して次のように求めることができる⁴⁾。ただし、 $COV(\cdot)$ は変動係数を意味する。

$$COV(E) = \{COV^2(\sigma_y^0) + (1/\sigma_y^{0*})^2 (F^T F)_{22}^{-1} (\sigma_u^0)^2\}^{1/2} \quad (4)$$

$$COV(K) = (\sigma_u^0) \{ (1/K \sigma_y^{0*})^2 (F^T F)_{11}^{-1} + (1/\sigma_y^{0*})^2 (F^T F)_{22}^{-1} + 2(1/K \sigma_y^{0*}) (F^T F)_{12}^{-1} \}^{1/2} \quad (5)$$

$$COV(\tau_{xy}^0) = \{ (1/\tau_{xy}^{0*})^2 (F^T F)_{33}^{-1} (\sigma_u^0)^2 + COV^2(E) \}^{1/2} \quad (6)$$

なお、 $\bar{\cdot}$ はその量の平均値を意味し、およその値は知られているものとする。また、 $(F^T F)_{ij}^{-1}$ は、式 (2) に示される行列 $([F]^T[F])^{-1}$ の成分で、計測配置の関数となる。さらに、逆解析結果を用いて式 (1) によって求められる予測変位の精度 (標準偏差) σ_u は次のようになる。

$$\sigma_u = (\sigma_u^0) \{ f_1^2 (F^T F)_{11}^{-1} + f_2^2 (F^T F)_{22}^{-1} + f_3^2 (F^T F)_{33}^{-1} + 2f_1 f_2 (F^T F)_{12}^{-1} + 2f_2 f_3 (F^T F)_{23}^{-1} + 2f_3 f_1 (F^T F)_{13}^{-1} \}^{1/2} \quad (7)$$

式 (4)~(7) を計測位置の良好度を表す指標とする。

4. 数値シミュレーション

図 2 に示す 2 車線道路トンネルを例にとり数値シミュレーションを行う。地中変位はエクステンソメータを用いて計測するものとして、3 測線左右対称に配置する。ここでは、天端から鉛直上向きの測線を固定して、斜測線の水平からの角度 θ をパラメータとして、最適な角度について検討する。

図 3 は逆解析によって得られる地山の弾性係数の精度を、式 (4) を用いて求めた一例である ($\theta = 15^\circ$ の場合)。図 3 において、計測変位の精度を $\sigma_u^0 = 1\text{mm}$ とすると、 $\sigma_y^{0*} = 0.001$ の場合、 $COV(E) = 0.17$ を得

る。いま、対象とする地山に対して、 $\bar{E} = 10000 \text{ kg/cm}^2$ を仮定すると、逆解析によって求められる E の精度 (標準偏差) は約 1700 kg/cm^2 と評価される (図 3 (A) のプロセス)。一方、 E を 1000 kg/cm^2 の精度で推定したい場合は、計測変位の精度として 0.5 mm は必要となることが分かる (図 3 (B) のプロセス)。

図 4 は斜測線の角度 θ と式 (4)~(6) から求められる変動係数の関係である。この図から、側圧係数は斜測線角度が $\theta < 30 \sim 40^\circ$ の場合、また初期応力のせん断成分は $30^\circ < \theta < 60^\circ$ の場合、に他の角度に比べて精度良く求められることが分かる。一方、弾性係数はどの角度に対してもほぼ同程度の精度で求められる。これは地山を等方と仮定しているためと考えられる。以上のことを総合的に評価すると、斜測線角度は $\theta = 30 \sim 45^\circ$ に配置するのが良いと考えられる。

なお、予測変位の精度についても、式 (7) を用いれば同様に検討できる⁴⁾。

5. むすび

精度良く逆解析を行うための計測配置を定量的に検討する方法を提案した。

参考文献: 1) N. Shimizu and S. Sakurai, Proc. 5th Int. Conf. Boundary Elements, p.645, 1983. 2) 桜井・清水, 土と基礎, 35(350), p.17, 1987. 3) 桜井・清水・垂内, 土木学会論文集, 382, p.55, 1987. 4) 垣原裕, 山口大学卒業論文, 1993.

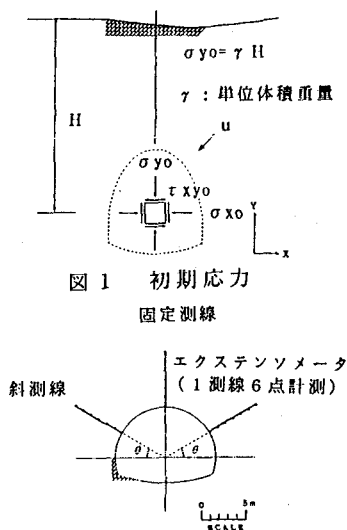


図 2 変位計測線の配置

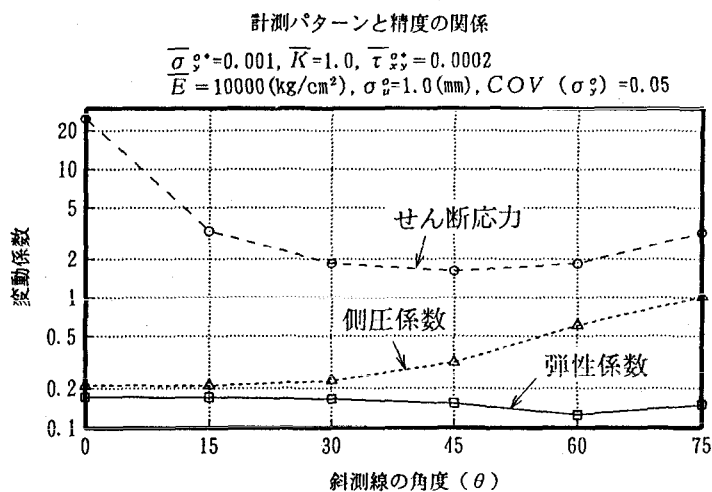


図 4 計測パターンと精度の関係

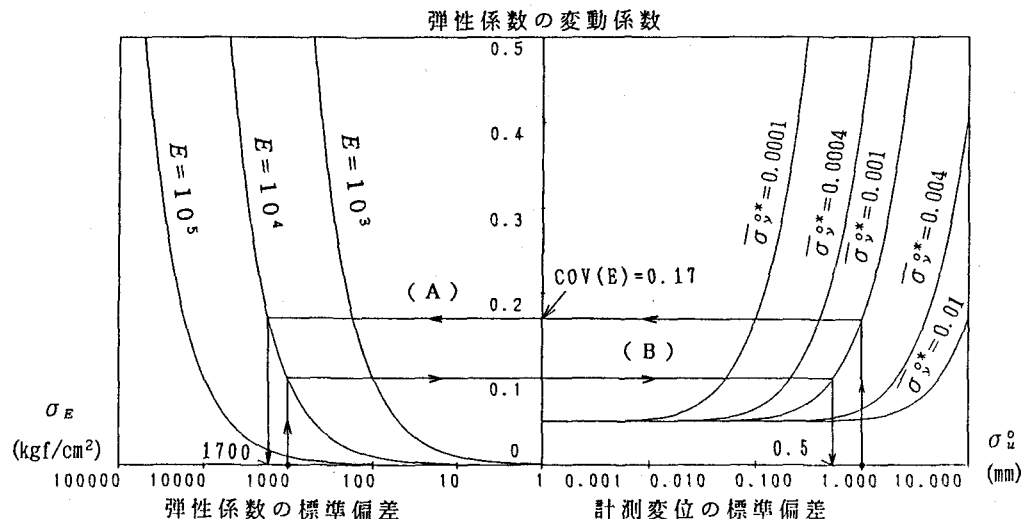


図 3 弾性係数の評価例 (斜測線の計測角度 15°)